

Evaluación de la morfología del racimo mediante análisis de imágenes 2D y 3D

El tamaño, la forma o compacidad del racimo influyen notablemente en la calidad de la uva

S. Cubero^{1,2}, J. Tello², M.P. Diago², N. Aleixos³, J. Ibáñez², J. Tardáguila², J. Blasco¹.

¹ Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), Moncada (Valencia).

² Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (Universidad de La Rioja, CSIC, Gobierno de La Rioja), Logroño.

³ Instituto Interuniversitario de Investigación en Bioingeniería y Tecnología Orientada al Ser Humano, Universitat Politècnica de València, Valencia.



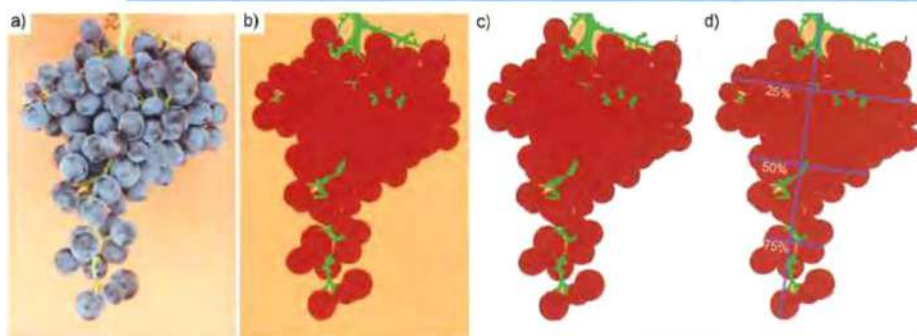
En este trabajo se han estudiado dos metodologías basadas en análisis de imágenes 2D y 3D para determinar la compacidad, el tamaño, el volumen y la forma del racimo de un modo objetivo a partir de la estimación de ciertas características morfológicas. Entre otros logros, se han desarrollado algoritmos de procesamiento de imágenes que extraen de manera automática estas características a partir de fotografías de los racimos y se han creado modelos estadísticos capaces de predecir la compacidad de los racimos de forma no invasiva, objetiva y cuantitativa.

Los racimos se pueden clasificar desde poco densos (o sueltos), con una buena aireación de las bayas, a muy densos (o compactos), donde las bayas se encuentran apretadas o en capas interiores, con escasa circulación de aire y diferente exposición al sol. Esto causa una maduración heterogénea en el racimo y lo hace más susceptible a enfermedades fúngicas. Consecuentemente, los productores tratan de obtener racimos de menor densidad, considerados de mayor calidad comercial y aptitud enológica (Tello *et al.* 2015). Por este motivo, la compactidad se considera como uno de los aspectos clave a la hora de evaluar la calidad de los racimos de vid.

En la actualidad se usa un descriptor basado en la inspección visual del racimo (OIV, 2007) para evaluar la compactidad del racimo. Este método es subjetivo y cualitativo, y resulta de difícil implantación en una industria que requiere controles de calidad claros, objetivos y cuantitativos (Tello e Ibáñez 2014). Una alternativa es la creación de métodos automáticos basados en el análisis de imágenes (Blasco *et al.*, 2014a y 2014b). El procesamiento de imágenes se ha utilizado en viticultura para la evaluación de los componentes del racimo, como el número y tamaño de las bayas o el peso total del racimo (Diago *et al.* 2014a y 2014b; Cubero *et al.* 2014). Recientemente, Cubero *et al.* (2015) han propuesto una nueva metodología para la adquisición y análisis de imágenes 2D con el objetivo de extraer atributos relacionados con la compactidad del racimo y mejorar el método actual de estimación visual.

En otros trabajos, se ha ensayado la reconstrucción 3D de la estructura del racimo a partir de imágenes en 2D o estereoscopía para evaluar diferentes atributos (Herrero-Huerta *et al.* 2015; Ivorra *et al.* 2015). Según este último, la compactidad se podría estimar a partir de tres descriptores 3D: concavidad, intersección entre bayas y número de bayas por área. Sin

FIG 1. a) Imagen original, b) imagen segmentada, c) área correspondiente a bayas (marrón), raquis (verde) y huecos (naranja) y d) eje principal de inercia y anchura al 25, 50 y 75% de la longitud del eje.



embargo, no se conocen trabajos de escaneo láser 3D aplicado al análisis de la morfología del racimo.

Este trabajo presenta una metodología para estimar la compactidad del racimo de forma cuantitativa, precisa y objetiva a partir de parámetros morfológicos obtenidos mediante técnicas de análisis de imagen 2D y escaneo láser 3D.

Adquisición de imágenes 2D y 3D

Para realizar los experimentos se utilizaron ochenta racimos vendimiados en parcelas del Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino, de ocho las variedades tintas de *Vitis vinifera* L.: Aramon, Bobal, Cabernet Franc, Danugue, Derechero de Muniesa, Monastrell, Moravia Agria y Ruby Seedless, tomando diez racimos por variedades seleccionada. Estas variedades presentan de manera natural racimos de diverso tamaño, forma y compactidad.

Las imágenes 2D se adquirieron en el interior de una campana de inspección consistente en una cámara réflex (Canon EOS

550D) e iluminación compuesta por tubos fluorescentes de 6500 K orientados a 45°. Los racimos se colgaron del pedúnculo para no distorsionar su forma, y se utilizó un fondo uniforme para facilitar la posterior segmentación de las imágenes. Se fotografiaron cuatro caras de cada racimo con una resolución de 0,12 mm/píxel. El proceso de digitalización en 3D se realizó con el dispositivo portátil UNIScanTM (Creaform, Leinfelden-Echterdingen). El propio software del escáner genera automáticamente el modelo y calcula el volumen del objeto (V3D).

Paralelamente, catorce expertos caracterizaron la compactidad de cada racimo siguiendo el descriptor 204 de la OIV y dando una calificación visual a cada racimo entre 1 y 9, donde 1 corresponde a los racimos menos compactos y 9 a los más compactos. La calificación final para cada racimo fue el promedio de las catorce puntuaciones (COMP). Tras esto, se pesó el racimo (PES) con una balanza de precisión (Blauscal AC-5000) y se midió su longitud (L) y anchura (W) según los descriptores 202 y 203 de la OIV. La compactidad (COM) se calculó de manera objetiva según la **ecuación 1** (Tello e Ibáñez, 2014) y la elongación (ELO) según la **ecuación 2**. El volumen del racimo se estimó utilizando el método de desplazamiento de agua (VDA) descrito por Tello e Ibáñez (2014).

Ecuación 1

$$COM = PES / L^2$$

Ecuación 2

$$ELO = L / W$$

El primer paso para el análisis de las imágenes 2D consistió en una segmentación para discriminar entre los píxeles de fondo, baya y raquis (figura 1b). Para entrenar el modelo de segmentación, se seleccionó manualmente un conjunto representativo de píxeles de cada clase en varias imágenes que no se utilizaron después para generar el modelo de clasificación de píxeles. Este proceso se realizó utilizando el programa de libre acceso Food-ColorInspector (disponible en <http://www.cofilab.com>). A partir de la imagen segmentada se calcularon los porcentajes de área del racimo completo (A) y los correspondiente a bayas (AB), raquis (AR) y huecos (AH) (figura 1c) y otras características morfológicas como perímetro (P), longitud (L) anchura máxima (W), el eje principal de inercia y la anchura al 25% (W25), 50% (W50) y 75% (W75) sobre el eje principal de inercia, como se muestra en la figura 1d. También se calcularon otras características como el ratio A/P (AP), la relación de aspecto (AS), el factor de compacidad de la forma (CSF) y la redondez (RD) según las ecuaciones 3, 4 y 5.

Para la reconstrucción geométrica del racimo y el cálculo de su volumen morfológico, se dividieron los racimos en cuatro partes iguales considerando las anchuras correspondientes al 25, 50 y 75% de su longitud. Las partes superior e inferior se consideraron cilíndricas y las dos intermedias como dos conos truncados, tal y como indica la figura 2b.

El volumen morfológico (VM) se calculó como la suma de los volúmenes correspondientes a las cuatro par-

Ecuación 3

$$AS = W/L$$

Ecuación 4

$$CSF = P^2/A$$

Ecuación 5

$$RD = (4.0 \times \pi \times A) / P^2$$

tes en las que se dividió el racimo según las ecuaciones 6 a 10.

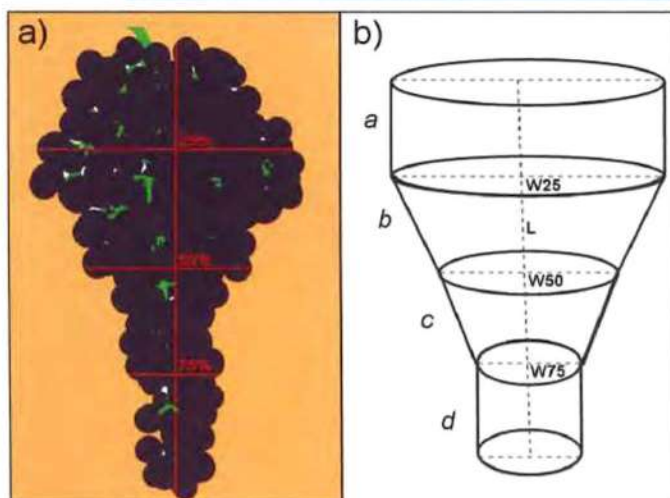
Estimación del tamaño, forma y volumen con análisis de imagen

El tamaño del fruto se estimó a través de la evaluación de las dos dimensiones principales del racimo (longitud y anchura), mientras que la elongación se calculó como la relación entre ellas. Los coeficientes de Pearson mostraron un alto nivel de correlación entre el método manual y el basado en el análisis de imagen: $r = 0,959$ para la longitud del racimo y $0,861$ para la anchura. Para la elongación del racimo se obtuvo también una correlación significativa ($r = 0,852$), con

un ratio que osciló entre 1,01 (Cabernet Franc) y 2,84 (Ruby Seedless). En conjunto, nuestros resultados sugieren que el tamaño y la elongación de los racimos se pueden medir con precisión mediante el análisis de imágenes 2D en sustitución de los sistemas tradicionales.

La singular arquitectura de la inflorescencia de la vid conduce a la diferenciación entre el volumen real y el morfológico del racimo (Tello *et al.*, 2015). En este trabajo, se han aplicado dos nuevos métodos para la estimación del volumen morfológico, uno a partir de la digitalización directa 3D del racimo y otra partiendo de una reconstrucción geométrica del racimo a partir de variables extraídas de imágenes 2D. Ambos métodos mostraron un alto nivel de correlación para la medición obtenida respecto del método manual ($r = 0,956$ y $0,953$ para los métodos 2D y 3D, respectivamente), y unos coeficientes de determinación (R^2) de 0,914 para el sistema 2D y 0,908 para el 3D. A partir de estos datos, se concluye que tanto el método 2D como el 3D calculados en este trabajo se podrían utilizar para la estimación precisa del volumen del racimo. Sin

FIG 2. a) Eje principal de inercia y anchura en el 25, 50 y 75% sobre la longitud del eje y b) las cuatro partes en que se divide cada racimo para estimar su volumen.



Ecuación 6

$$VM = VM_a + VM_b + VM_c + VM_d$$

Ecuación 7

$$VM_a = \pi \times \left(\frac{W_{25}}{2} \right)^2 \times \frac{L}{4}$$

Ecuación 8

$$VM_b = \frac{\pi}{3} \times \left[\left(\frac{W_{25}}{2} \right)^2 + \left(\frac{W_{50}}{2} \right)^2 + \left(\frac{W_{25} \times W_{50}}{2} \right) \right] \times \frac{L}{4}$$

Ecuación 9

$$VM_c = \frac{\pi}{3} \times \left[\left(\frac{W_{50}}{2} \right)^2 + \left(\frac{W_{75}}{2} \right)^2 + \left(\frac{W_{50} \times W_{75}}{2} \right) \right] \times \frac{L}{4}$$

Ecuación 10

$$VM_d = \pi \times \left(\frac{W_{75}}{2} \right)^2 \times \frac{L}{4}$$

ABONOS TRY

CUADRO I

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE CIERTOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE ANÁLISIS DE IMAGEN Y LOS OBTENIDOS DE FORMA VISUAL POR EL PANEL DE EXPERTOS Y EL VALOR CUANTITATIVO DE COMPACIDAD CALCULADO SEGÚN EL ÍNDICE OBJETIVO PROPUESTO POR TELLO E IBÁÑEZ (2014)

	COMP	COM
AR + AH	-0,672	-0,730
L	-0,257	-0,234
W	No significativo	0,320
W25	No significativo	0,346
W50	0,230	0,516
W75	0,581	0,765

embargo, al comparar ambos sistemas, el método 3D genera valores inferiores a los dados por el sistema 2D, más similares a los obtenidos por el método manual (VDA). Los racimos más grandes analizados en este trabajo son de la variedad Ruby Seedless, que presentan una apariencia poco densa con numerosos huecos en su estructura. El método 3D excluye una fracción del volumen vacío en este tipo de racimos, provocando que se subestime el volumen morfológico en comparación con los otros métodos. Por otro lado, dado que los racimos compactos tienen menos cavidades, el método 3D resulta más preciso para estos casos. En definitiva, el sistema 2D es aparentemente más apropiado para la evaluación del volumen morfológico en un contexto multivarietal.

Evaluación de la compacidad con análisis de imagen

Recientemente, Cubero *et al.* (2015) han demostrado que el análisis de imágenes 2D permite la determinación de ciertos atributos relacionados con la compacidad que no pueden ser evaluados de forma visual. Algunos de esos atributos han obtenido una correlación significativa tanto con el valor de compacidad obtenido por el panel de expertos (COMP) como por el valor objetivo de compacidad (COM), mostrando su relación (**cuadro I**).

El porcentaje de píxeles no ocupado por bayas (área de rakis y huecos, AR+AH) obtenido mediante análisis 2D mostró la mayor correlación con los valores obtenidos por el panel de expertos (0,672) y con el índice objetivo de compacidad (0,730). Se calculó un Anova de esta variable (AR+AH) mostrando resultados estadísticamente significativos. No obstante, los test de diferencia mínima significativa de Fisher revelaron que esta variable no es capaz de diferenciar significativamente entre los racimos densos y los muy densos, que no tienen pedicelos visibles ni huecos libres en su estructura. Según el descriptor 204

AMINOÁCIDOS SÍNTESIS

- Anti-estrés
- Mayor brotación
- Frutos de mayor tamaño
- Mayor coloración

NOVEDOSOS



EFICACES



**NPK LÍQUIDOS
DE RÁPIDA
ASIMILACIÓN**



SEGUROS

**MEZCLAS LÍQUIDAS
DE MICROELEMENTOS
COMPLEJADOS**

**QUELATOS LÍQUIDOS
CORRECTORES CARENCIAS**

- Muy asimilables
- Muy alta corrección de las carencias

ECOLÓGICOS



**VISÍTANOS EN
www.abonostry.es**

de la OIV, estos dos tipos de racimos se diferencian por la presencia de bayas deformadas.

Con la idea de mejorar los resultados obtenidos, se calculó otro índice objetivo (COM2) (Tello y Ibáñez, 2014) para evaluar la compacidad a partir de las mediciones obtenidas por el análisis de imágenes 2D (ecuación 11).

Ecuación 11

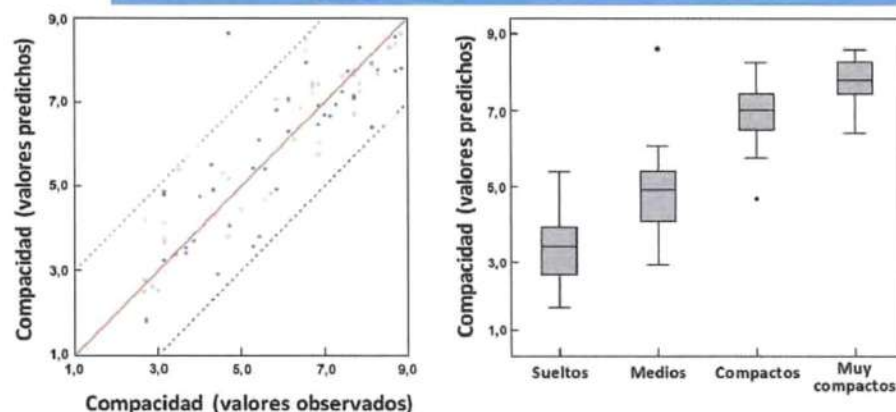
$$COM2 = VM/L^2$$

Este índice mostró coeficientes estadísticamente significativos de correlación con el valor de compacidad propuesto por el panel de jueces (COMP; $r = 0,591$) y con el primer índice objetivo (COM; $r = 0,775$). El Anova de un factor reveló un resultado estadísticamente significativo, siendo todos los grupos de compacidad estadísticamente diferentes, incluyendo los grupos de racimos compactos y muy compactos, que, como se ha mencionado anteriormente, no podían distinguirse utilizando únicamente el porcentaje de píxeles no ocupados por bayas en imágenes 2D.

A pesar de que las dos variables (AR+AH y COM2) evalúan diferentes características relacionadas con la compacidad, ambas explican una parte común de la variación morfológica de los racimos. Teniendo en cuenta que también aportan información independiente, se utilizaron como variables predictivas para la construcción de un modelo de regresión. El modelo creado para cuarenta de los ochenta racimos (ecuación 12) mostró una capacidad predictiva (R^2) del 71,1% sobre los cuarenta restantes racimos usados como grupo de validación, así como un valor del error RMSE de 1,12. Además, el valor predicho para la compacidad del racimo mostró una alta precisión para el conjunto de validación ($r = 0,843$).

Teniendo en cuenta la complejidad de la evaluación visual de la compacidad y del uso de una referencia subjetiva y cualitativa,

FIG 3. a) Valores observados vs predichos obtenidos por el modelo de regresión* y b) diagrama de caja con los resultados obtenidos por el modelo de regresión**.



* en el entrenamiento (círculos vacíos) y la validación (círculos rellenos). ** sobre racimos agrupados según su compacidad.

Ecuación 12

$$COM3 = 5,077 - 0,497 \times (AR + AH) + 1,596 \times \frac{VM}{L^2}$$

se considera aceptable la desviación en hasta una clase de compacidad (Tello e Ibáñez, 2014). Según el modelo propuesto, 79 de los ochenta racimos analizados entran dentro de ese rango de variación (figura 3a), lo que demuestra la utilidad del valor de compacidad obtenido automáticamente.

Utilizando todo el conjunto de racimos ($n = 80$), el Anova de un factor seguido de un test de diferencia mínima significativa de Fisher mostraron resultados estadísticamente significativos para los diferentes grupos de compacidad visual (figura 3b). Los valores dados por el modelo a cada racimo mostraron altos coeficientes de correlación tanto con el valor de compacidad visual dado por el panel de expertos (COMP; $r = 0,721$) como con el índice objetivo de compacidad (COM; $r = 0,878$). Este modelo presenta una capacidad predictiva similar a las descritas por Ivorra *et al.* (2015) ($R^2 = 80,8\%$) y Cubero *et al.* (2015) ($R^2 = 85,3\%$). Sin embargo, este nuevo modelo presenta la ventaja de utilizar solo seis variables (AR, AH, L, W25, W50 y W75) que se pueden calcular sin apenas coste computacional a

partir del análisis de imágenes 2D. En resumen, estos resultados sugieren que este método resulta capaz de evaluar de forma precisa, rápida, automática y objetiva la compacidad de los racimos utilizando técnicas de análisis de imagen.

Conclusiones

En este trabajo, se han desarrollado métodos para evaluar diferentes atributos de los racimos como la compacidad, tamaño, volumen y forma, utilizando técnicas de análisis de imagen 2D y escaneo láser en 3D. Los resultados obtenidos se han comparado con los sistemas de estimación tradicionales, demostrando que la metodología basada en imágenes 2D propuesta podría ser utilizada para la caracterización de racimos de uva de una manera rápida y eficiente. ■

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MINECO a través del proyecto AGL2010-15694, por el INIA a través de los proyectos de investigación RTA2012-00062-C04-01 y RTA2012-00062-C04-03 con el apoyo de fondos europeos FEDER y por la beca predoctoral BES-2011-047041 (J. Tello).

BIBLIOGRAFÍA

Existe una amplia bibliografía a disposición de nuestros lectores que pueden solicitar a través del e-mail: redaccion@eumedia.es